

## 방호·방폭용 뿔칠형 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 개발을 위한 레올로지 특성 연구

# A Study on the Rheology Properties for Development of Sprayed High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for Protection and Blast Resistant

최연왕<sup>1\*</sup> · 최병걸<sup>1</sup> · 박만석<sup>1</sup> · 성 돈<sup>2</sup>

Yun-Wang Choi<sup>1\*</sup> · Byung-Keol Choi<sup>1</sup> · Man-Seok Park<sup>1</sup> · Don Sung<sup>2</sup>

(Received August 4, 2014 / Revised August 25, 2014 / Accepted September 10, 2014)

This paper was evaluated the rheology properties according to each step of paste, mortar and HPFRCC as a part of the basic study to development of sprayed high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCC) for protection and blast resistant. Rheology test results in step of paste, in case of GGBFs and FA, it showed that the plastic viscosity and yield stress reduced gradually according to the increase of mixing rate, and in case of SF, the plastic viscosity and yield stress increased radically starting from the mixing rate of 10%. Rheology test results in step of mortar, type of aggregates, it showed that particle shape and grading of aggregate is influence on plastic viscosity and yield stress, and change of volume ratio is influence on plastic viscosity than yield stress. Fluidity and rheology test results in step of HPFRCC, if after a fiber mixed, it showed that viscosity agent is more effective to improve the fluidity and fiber dispersion than superplasticizer.

**키워드** : 방호·방폭, 뿔칠, 고성능, 섬유보강, 레올로지

**Keywords** : Protection and Blast Resistant, Sprayed, High Performance, Fiber Reinforced, Rheology

## 1. 서론

2001년 9·11 테러, 2010년 연평도 포격 사건 그리고 최근의 여수·안산 화학단지의 폭발사고 등 국내·외적으로 국방시설물 이외 사회기반시설물 및 민간시설물이 극한의 외력에 직접적으로 노출되는 위험도가 높아지고 있으며, 이에 따라 사고 및 테러에 대한 콘크리트구조물의 안전성 확보가 사회적으로 급증하여 요구되고 있다.

또한, 콘크리트구조물이 기본적으로 갖춰야하는 구조부재로서 압축응력 부담 등의 성능 이외 충격 및 폭발에 대한 저항 성능 향상에 대한 요구가 증가되어 힘인장강도, 변형률 및 연성의 취약점을 보완하고자 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(High

Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HPFRCC)에 대한 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다 (Li et al., 2001; Kim et al., 2005; Nam et al., 2013; Song et al., 2013; Ranade et al., 2013).

그러나 아직까지 사회기반시설물 및 민간시설물의 효율적인 방호·방폭 시스템을 구성하는 재료 및 자재에 대한 연구개발은 미흡한 실정이다. 또한 신설 구조물과 달리 사용 중인 구조물의 경우에는 제한된 크기 내에서 방호·방폭 성능을 극대화할 수 있는 보강용 고성능 복합재료 및 적용기술의 연구개발이 필요한 실정이지만, 국내의 보수·보강 기술은 일반적인 하중에 대한 구조적 보수·보강이나 미관적인 경우가 대부분을 이루고 있으며, 활용되고 있는 보수·보강 재료조차도 수입에 의존하는

\* Corresponding author E-mail: crete77@semyung.ac.kr

<sup>1</sup>세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea)

<sup>2</sup>한국종합기술 국토설계부 (Korea Engineering Consultants Corp., Seoul, 134-838, Korea)

경우가 많다.

한편, 기존 구조물의 방호·방폭 보강용 복합재료 기술은 적용 조건에 따라 뿔철형, 외피형 및 패널형으로 구분할 수 있으며, 특히, 뿔철형 복합재료의 경우 시공 단계별로 요구되는 상이한 유동특성을 제어하는 것이 매우 중요한 문제로 보고되고 있다 (Kim, 2003). 즉, 뿔철용 펌프에 의하여 재료가 호스를 거쳐 노즐까지 이동하는 중에는 펌프압송에 용이한 낮은 점성이 요구되며, 고압의 공기분사에 의하여 노즐에서 타설면으로 뿔철 된 후에는 높은 점착성이 발현되어 타설면과의 부착 및 재료의 일체성을 유지하여야 한다(Park et al., 2008). 또한, 방호·방폭 시스템에 특화된 뿔철형 복합재료의 품질 및 제어 기술 개발을 위해서는 1차적으로 뿔철에 적용되는 다양한 구성재료의 유동특성을 정량적으로 평가하는 것이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 기존 구조물의 방호·방폭 보강용 뿔철형 HPFRCC 개발을 위한 기초적인 연구의 일환으로 페이스트, 모르타르 및 HPFRCC 각 단계에서 구성재료의 레올로지 특성을 평가하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 결합재

본 논문에서 결합재는 밀도 3,15g/cm<sup>3</sup> 및 분말도 3,540cm<sup>2</sup>/g 의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 고로 슬래그미분말(이하 GGBFs로 약함), 플라이애시(이하 FA로 약함) 및 실리카퓌(이하 SF로 약함)를 사용하였다. Table 1은 본 논문에서 사용된 결합재의 화학성분 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

#### 2.1.2 골재

골재는 KS L ISO 679에서 규정하는 표준사를 사용하였으며, 60~150mesh, SiO<sub>2</sub> 95% 이상 7호 규사, 낙동강산 강모래, 인천

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	F.M.	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )
Standard sand	KS L ISO 679			
Quartz sand	2.65	60~150mesh, SiO <sub>2</sub> 95% 이상		
River sand	2.56	2.70	1.56	1,670
Sea sand	2.57	2.96	0.80	1,719
Crushed sand	2.54	3.02	1.17	1,739

Table 3. Physical properties of fiber

Type	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
PVA	8	39	1600	40	1.30

산 바다모래 및 주천산 부순모래를 사용하였다. Table 2는 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

#### 2.1.3 섬유

섬유는 길이 8mm, 직경 39μm의 일본 K사 폴리비닐알코올(이하 PVA로 약함) 섬유를 사용하였다. Table 3은 섬유의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

#### 2.1.4 화학 혼화제

화학 혼화제는 폴리카본산계 고성능 감수제(이하 SP로 약함)를 사용하였으며, 고품분 24~25%의 액상형 우레탄계 증점제(이하 VA로 약함)를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 실험계획 및 배합

페이스트 실험은 결합재별 레올로지 특성 평가를 위하여 물-결합재비(이하 W/B로 약함) 50%의 OPC, GGBFs, FA 및 SF를 각각 100% 결합재로 사용한 페이스트를 제조하였으며, 페이스트 점도계를 이용하여 소성점도 및 항복응력을 측정하였다.

Table 1. Chemical compositions and physical properties of binder

Type	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	L.O.I (%)	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
OPC	61.60	19.80	4.50	3.01	3.57	2.10	1.20	3,450	3.15
GGBFs	34.95	31.85	14.55	5.63	0.59	2.97	0.60	4,070	2.82
FA	5.95	52.83	18.08	1.43	7.74	0.01	6.14	3,710	2.34
SF	0.39	93.8	0.31	0.42	0.83	-	2.80	200,000	2.18

또한, 결합재 혼합률에 따른 레올로지 특성 평가를 위하여 W/B 35%의 OPC를 100% 결합재로 사용한 기준 페이스트 배합에서 OPC 부피에 대하여 GGBFs 3수준(15%, 30% 및 45%), FA 3수준(10%, 20% 및 30%) 및 SF 3수준(5%, 10% 및 15%)으로 혼합하여 SP 0.5%(Binder mass X%)를 동일하게 사용한 페이스트를 제조하였으며, 각각의 페이스트에 대하여 소성점도 및 항복응력을 측정하였다.

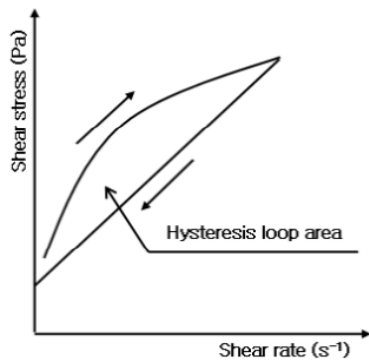
모르타르 실험은 잔골재 종류별 레올로지 특성을 평가하기 위하여 W/B 35%, 잔골재-모르타르 용적비(이하 Vs/Vm으로 약함) 40%, SP 0.5% 및 OPC를 100% 결합재로 사용한 배합에서 표준사, 규사, 강모래, 바다모래 및 부순모래를 각각 100% 골재로 사용한 모르타르를 제조하였으며, 모르타르 점도계를 이용하여 소성점도 및 항복응력을 측정하였다.

또한, Vs/Vm 변화에 따른 레올로지 특성을 평가하기 위하여 W/B 35%, SP 0.5%, OPC 및 규사를 결합재 및 골재로 100% 사용한 배합에서 Vs/Vm을 5수준(36%, 38%, 40%, 42% 및 45%)으로 변화한 모르타르를 제조하였으며, 각각의 모르타르에 대하여 소성점도 및 항복응력을 측정하였다.

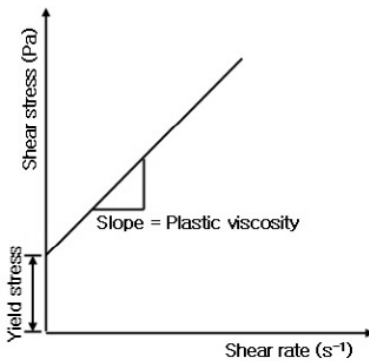
HPFRCC 실험은 화학 혼화제 사용량에 따른 유동성, 레올로지 특성 및 섬유 분산성을 평가하기 위하여 W/B 34%, Vs/Vm 36%, SP 0.6% 및 OPC 및 규사를 결합재 및 골재로 100% 사용한 기준 HPFRCC 배합에서 PVA 섬유 2% (Vol. X%)를 혼합한 다음 SP 5수준(0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2% 및 1.5%) 및 VA 5수준(0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 및 1.0%)으로 추가한 HPFRCC를 제조하였으며, 각각의 HPFRCC에 대하여 소성점도 및 항복응력, 테이블 플로를 측정하였다.

### 2.2.2 레올로지 시험

페이스트의 소성점도 및 항복응력을 측정하기 위하여 Brookfield사의 페이스트 점도계 DV-II Pro 모델을 사용하여 전단속도 (Shear rate)의 변화에 따른 전단응력(Shear stress)의 변화량을 측정하였다. 또한, Fig. 1(a)와 같이 Hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 전단속도를 하강계단식으로 설정하여 측정하였으며, 측정된 전단응력의 직선회귀분석을 통하여 Fig. 1(b)와 같이 Bingham 모델로 해석하였다. Fig. 2(a)는



(a) Hysteresis model



(b) Bingham model

Fig. 1. Analysis model of rheology



(a) Paste rheometer



(b) Mortar rheometer

Fig. 2. Rheometer

페이스트 점도계를 나타낸 것이다.

모르타르의 소성점도 및 항복응력을 측정하기 위하여 Brookfield 사의 페이스트 점도계 DV-III Ultra 모델의 챔버 크기를 변형한 모르타르 점도계를 사용하였다. 전단속도 및 전단응력은 페이스트 점도계와 동일한 방법으로 측정하였다. Fig. 2(b)는 모르타르 점도계를 나타낸 것이다.

### 2.2.3 테이블 플로 시험

테이블 플로 시험은 KS L 5111에 규정하는 플로 테이블을 이용하여 KS L 5105의 플로 결정 방법에 준하여 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 페이스트 단계의 레올로지 특성 분석

기존 구조물의 방호·방폭 보강용 뿔철형 HPFRCC 개발을 위한 기초적인 연구의 일환으로 페이스트 단계에서 HPFRCC에 주로 사용되는 결합재별 레올로지 특성 및 결합재 혼합률에 따른 레올로지 특성을 평가하였다.

#### 3.1.1 결합재별 레올로지 특성

Fig. 3은 결합재별 레올로지 특성을 평가하여 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과, 소성점도 및 항복응력은 OPC > FA > GGBFs 순으로 나타났으며, 소성점도의 범위는 0.13~0.39Pa·s, 항복응력의 범위는 0.42~1.79Pa로 나타났다.

한편, SF의 경우, 본 연구에서 계획한 배합으로는 혼합이 되지 않아 레올로지의 측정이 불가하였으며, 이러한 원인은 다른 결합재들과 비교하여 비표면적이 매우 크기 때문에 물의 구속력이 커져 발생한 것으로 판단된다.

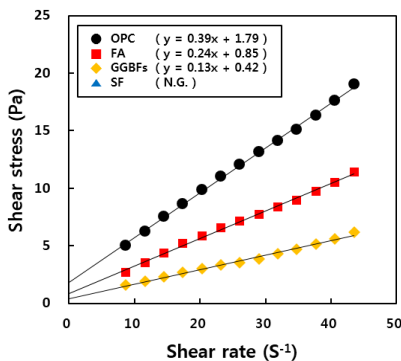
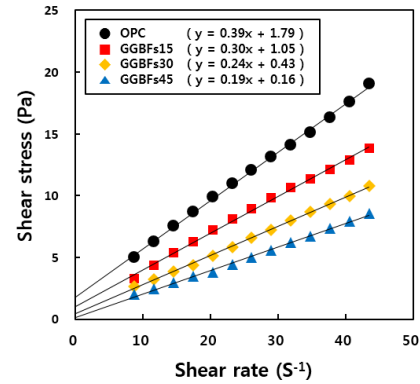


Fig. 3. Rheology properties according to type of binder

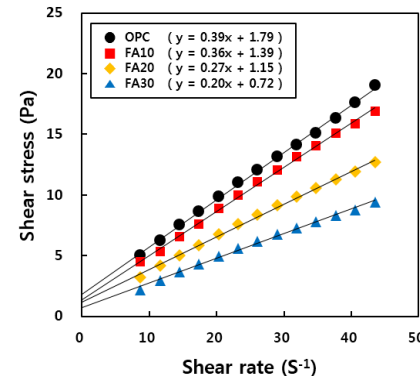
#### 3.1.2 결합재 혼합률에 따른 레올로지 특성

Fig. 4는 결합재 혼합률에 따른 레올로지 특성을 평가하여 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과, GGBFs 및 FA의 경우, 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력은 감소되는 것으로 나타났으며, SF의 경우, 혼합률 10% 이후부터 소성점도 및 항복응력이 급격하게 증가되는 것으로 나타났다.

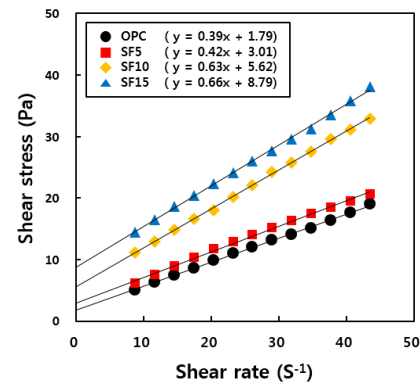
이러한 결과는 GGBFs의 경우, 입자표면이 비결정의 유리질로



(a) GGBFs



(b) FA



(c) SF

Fig. 4. Rheology properties according to replacement ratio of binder

써 매끄럽고 물을 잘 흡수하지 않는 구조이며, OPC 및 FA 보다 안정된 제타전위를 가지는 특징이 있어 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력이 감소되는 것으로 판단되며, FA의 경우, 입형이 대부분 구형이기 때문에 볼베어링 효과에 의하여 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력이 감소되는 것으로 판단된다.

한편 SF의 경우, 앞서 언급한 것과 같이 GGBFs 및 FA와 비교하여 비표면적이 약 50배 정도 크기 때문에 상대적으로 입자가 물과 접할 수 있는 면적이 증가하여 유동성 감소 및 점성증대로 이어져 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력이 증가되는 것으로 판단된다.

### 3.2 모르타르 단계의 레올로지 특성 분석

기존 구조물의 방호·방폭 보강용 뿔침형 HPFRCC 개발을 위한 기초적인 연구의 일환으로 모르타르 단계에서 잔골재 종류별 레올로지 특성 및 Vs/Vm 변화에 따른 레올로지 특성을 평가하였다.

#### 3.2.1 잔골재 종류별 레올로지 특성

Fig. 5는 잔골재 종류별 레올로지 특성을 평가하여 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과, 소성점도 및 항복응력은 부순모래 > 바다모래 > 강모래 > 규사 > 표준사 순으로 나타났으며, 소성점도의 범위는 1.57~3.01Pa·s, 항복응력의 범위는 11.79~29.81Pa로 나타났다. 부순모래의 경우, 소성점도 및 항복응력이 가장 크게 나타났으며, 규사 및 표준사의 경우 소성점도 및 항복응력이 상대적으로 작게 나타났다. 잔골재의 종류 즉, 잔골재의 입형 및 입도는 소성점도 및 항복응력에 많은 영향을 미치는 것으로 나타남에 따라 방호·방폭용 뿔침형 HPFRCC 개발에 있어 적절한 잔골재의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 Vs/Vm 변화에 따른 레올로지 특성

Fig. 6은 Vs/Vm 변화에 따른 레올로지 특성을 평가하여 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과, Vs/Vm 증가에 따라 소성점도는 다소 증가되는 것으로 나타났으며, 항복응력의 변화는 미소하여 오차 범위에 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 Vs/Vm의 증감은 항복응력 보다 소성점도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.3 HPFRCC 단계의 레올로지 특성 분석

기존 구조물의 방호·방폭 보강용 뿔침형 HPFRCC 개발을 위

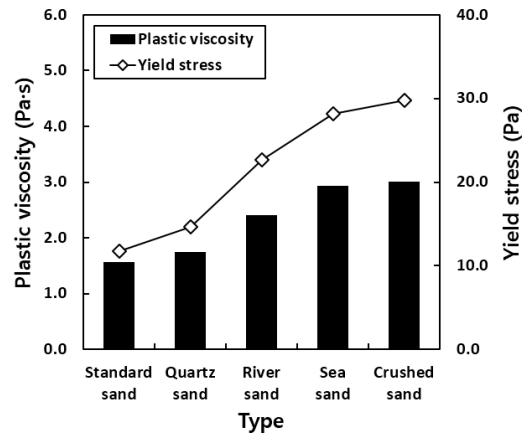


Fig. 5. Rheology properties according to type of fine aggregate

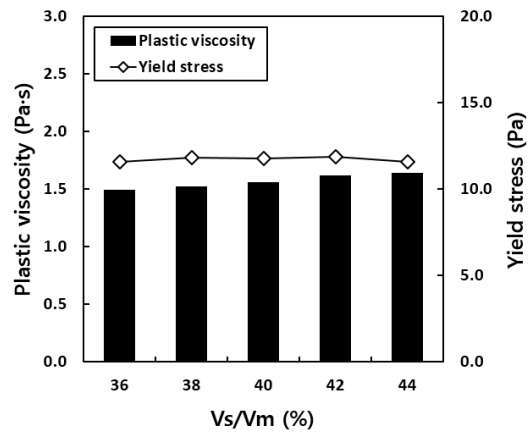


Fig. 6. Rheology properties according to Vs/Vm

한 기초적인 연구의 일환으로 HPFRCC 단계에서 섬유 혼입 후 화학 혼화제 사용량에 따른 유동성, 레올로지 특성 및 섬유 분산성을 평가하였다.

Fig. 7은 SP 사용량에 따른 HPFRCC의 테이블 플로를 나타낸 것이며, Fig. 8은 VA 사용량에 따른 HPFRCC의 테이블 플로를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과, 섬유를 혼입하지 않은 기준배합에 섬유 혼입 후 SP 사용량을 증가한 경우, 섬유 혼입 후 테이블 플로는 크게 감소되는 것으로 나타났다. 또한, SP 사용량 증가에 따라 테이블 플로는 다소 증가되는 것으로 나타났지만, SP 사용량 1.5%부터 재료분리가 발생하였으며, 섬유를 혼입하지 않은 기준 배합과 비교하여 SP 사용량을 약 4배 정도 증가하여도 섬유의 분산성을 개선시키지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 8의 결과, 섬유를 혼입하지 않은 기준배합에 SP 사용량을 고정하고 섬유 혼입 후 VA 사용량을 증가한 경우, 섬유 혼입 후

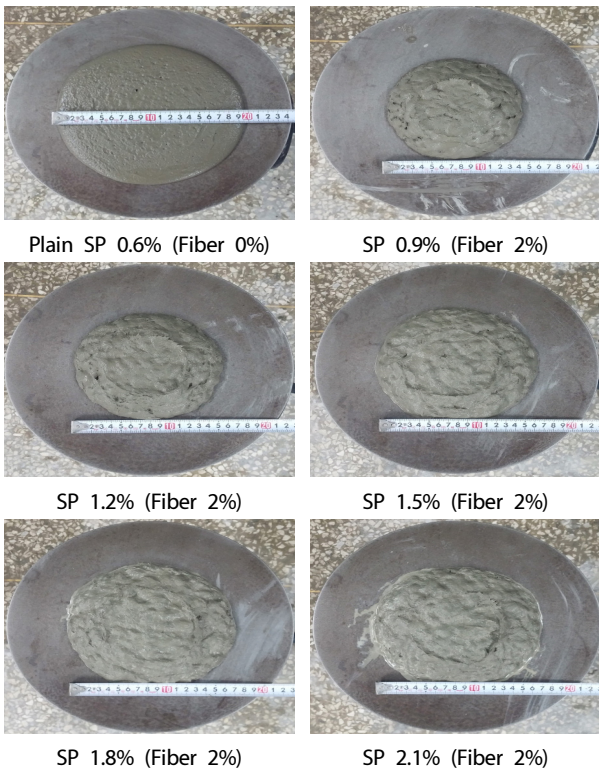


Fig. 7. Flow according to dosage of superplasticizer

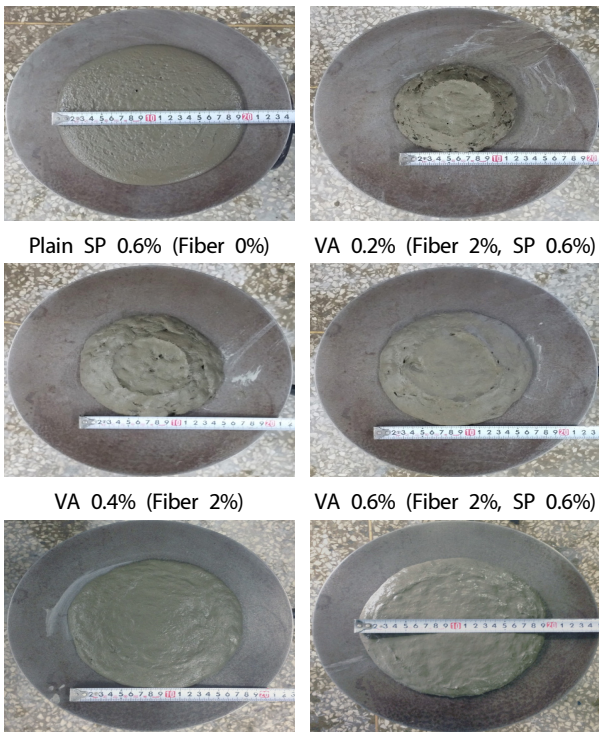


Fig. 8. Flow according to dosage of viscosity agent

테이블 플로는 크게 감소되는 것으로 나타났지만, VA 사용량 증가에 따라 테이블 플로는 증가되는 것으로 나타났으며, VA 사용량 1.0%에서 섬유를 혼입하지 않은 기준 배합과 비교하여 동등한 수준의 테이블 플로를 나타냈다. 또한, 재료분리 및 섬유의 뭉침 현상은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 SP 사용량에 따른 레올로지 특성을 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과, 섬유를 혼입하지 않은 기준배합에 섬유 혼입 후 SP 사용량을 증가한 경우, SP 사용량 0.9% 및 1.2%에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 섬유 뭉침현상이 발생하여 소성점도가 크게 감소되고 항복응력이 증가되는 것으로 나타났으며, 레올로지 평가인자에서 테이블 플로우 동등한 의미를 갖는 항복응력의 경우에는 소성점도와 동일하게 1.5% 이후 감소하는 경향이 나타났지만 이는 HPFRCC의 항복응력 감소 보다는 Fig. 7의 테이블 플로우 결과와 같이 재료분리 현상에 따른 영향인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 VA 사용량에 따른 레올로지 특성을 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과, 섬유를 혼입하지 않은 기준배합에 SP 사용량을 고정하고 섬유 혼입 후 VA 사용량을 증가한 경우, VA 사용량

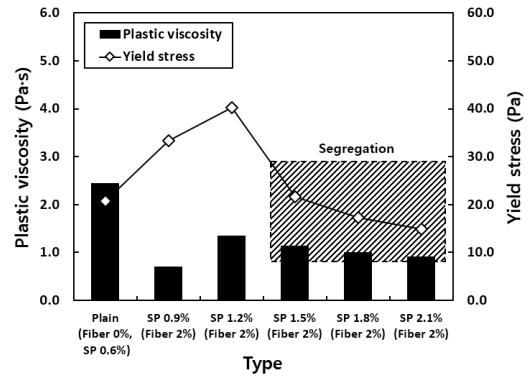


Fig. 9. Rheology properties according to dosage of superplasticizer

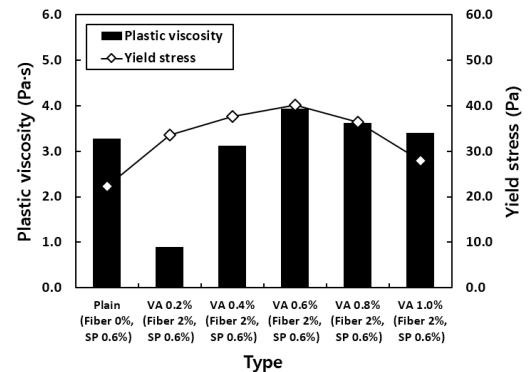


Fig. 10. Rheology properties according to dosage of viscosity agent

0.2%에서는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 섬유 뭉침현상이 발생하여 소성점도가 크게 감소되고 항복응력이 증가되는 것으로 나타났지만, VA 사용량 0.4%부터 소성점도 및 항복응력이 증가되는 경향을 보이다가 VA 사용량 0.8%부터 소성점도 및 항복응력은 감소하여 섬유를 혼입하지 않은 기준배합과 비교하여 동등한 수준의 소성점도 및 항복응력을 나타냈다. 이러한 결과는 VA 사용량 증가에 따라 섬유 분산성이 개선되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 SP 보다 VA가 섬유 분산성에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단할 수 있으며, 이에 따라 방호·방폭용 뿔칠형 HPFRCC 개발에 있어 섬유를 혼입하지 않은 모르타르 매트릭스의 소요 유동성을 만족할 수 있는 적절한 SP를 적용하고 섬유 혼입에 따라 VA 사용량 조절을 통하여 유동성 및 섬유 분산성 개선이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

기존 구조물의 방호·방폭 보강용 뿔칠형 HPFRCC 개발을 위한 기초적인 연구의 일환으로 페이스트, 모르타르 및 HPFRCC 각 단계에서 구성재료의 레올로지 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 페이스트 단계에서 레올로지 실험결과, GGBFs 및 FA의 경우 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력은 감소되는 것으로 나타났으며, SF의 경우 혼합률 10% 이후 소성점도 및 항복응력이 급격하게 증가되는 것으로 나타났다.
2. 모르타르 단계에서 레올로지 실험결과, 잔골재의 종류 즉, 잔골재의 입형 및 입도는 소성점도 및 항복응력에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며,  $V_s/V_m$ 의 증감은 항복응력 보다 소성점도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. HPFRCC 단계에서 유동성 및 레올로지의 실험결과, 섬유 혼입 후 유동성 및 섬유분산성 개선에는 SP 보다 VA가 더 유효한 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

Kim, Y.W. (2013). Development of a Sprayable Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite(ECC) Based on Micromechanics and Rheological Control, Journal of the Korea Concrete Institute, **15(4)**, 557–565.

Kim, Y.W., Kim, J.S., Ha, K.J., Cho, C.K., and Kim, J.K. (2007). Applications of ECC(Engineered Cementitious Composite) Based on Rheology Control of Cement Paste, Proceeding of Korea Concrete Institute, **19(1)**, 779–782.

Kim, Y.Y., Kim, J.S., Kim, H.S., Ha, K.J., and Kim, J.K. (2005). Mechanical Properties of an ECC(Engineered Cementitious Composite) Designed Based on Micromechanical Principle, Journal of the Korea Concrete Institute, **17(5)**, 709–716.

Ko, K.T., Kang, S.T., Park, J.J., and Ryu, K.S. (2004). A Study on the Improvement of Workability of High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **8(3)**, 141–148.

Ko, K.T., Park, J.J., Kim, B.Y., Lee, J.S., Kim, S.Y., and Lee, J.H. (2002). A Study on the Improvement of Construction Performance of Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites, proceeding of the Korea Concrete Institute, **14(2)**, 749–754.

Kwon, S.H., Kim, Y.J., Lee, K.C., and Choi, Y.W. (2013). Measurements and Applications of Concrete Rheology, Special Articles, Proceeding of Korea Concrete Institute, **25(3)**, 24–33.

Li, V. C., Wang, S., and Wu, C. (2001). Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC, ACI Materials Journal, **98(6)**, 483–492.

Nam, J.S., Kim, H.S., Lee, I.C., Miyauchi, H., and Kim, K.H. (2013). Evaluation on the Impact Resistant Performance of Fiber Reinforced Concrete by High-Velocity Projectile and Contacted Explosion, Journal of the Korea Concrete Institute, **25(1)**, 107–114.

Park, D.H., No, M.H., and Park, C.K. (2004). Characterization of Rheology on the Multi-Ingredients Paste Systems Mixed with Mineral Admixtures, Journal of the Korea Concrete Institute, **16(2)**, 241–248.

Park, S.B., Kim, J.S., Kim, Y.W. (2008). Rheology Control of

Cement Paste for Applying ECC Produced with Slag Particles to Self-Consolidating and Shotcreting Process, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(1)**, 67-75.  
Ranade, R., Li, V.C., Stults, M.D., Heard, W.F., and Rushing, T.S. (2013). Composite Properties of High-Strength, High-Ductility Concrete, ACI Materials Journal, **110(4)**, 413-422.

Song, Y.J., and Yun, H.D. (2013). Tension-Stiffening and Cracking Behavior of 100 MPa Shrinkage-Compensated Ultra High-Strength Strain-Hardening Cement Composite (UHS-SHCC) Ties, Journal of the Korea Concrete Institute, **25(4)**, 371-379.

**방호·방폭용 뽐칠형 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 개발을 위한 레올로지 특성 연구**

방호·방폭용 뽐칠형 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(HPFRCC) 개발을 위한 기초적인 연구의 일환으로 페이스트, 모르타르 및 HPFRCC 각 단계에서 구성재료의 레올로지 특성을 평가하였다. 페이스트 단계에서 레올로지 실험결과, GGBFs 및 FA의 경우 혼합률 증가에 따라 소성점도 및 항복응력은 감소되는 것으로 나타났으며, SF의 경우 혼합률 10% 이후부터 소성점도 및 항복응력이 급격하게 증가되는 것으로 나타났다. 모르타르 단계에서 레올로지 실험결과, 잔골재의 종류 즉, 잔골재의 입형 및 입도는 소성점도 및 항복응력에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며,  $V_s/V_m$ 의 변화는 항복응력 보다 소성점도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. HPFRCC 단계에서 유동성 및 레올로지의 실험결과, 섬유 혼입 후 유동성 및 섬유분산성 개선에는 SP 보다 VA가 더 유효한 것으로 나타났다.